# 螺旋藻对仔猪生长性能、免疫性能及粪便菌群的影响[1]

盛清凯[1]　刘　雪[2*]　韩　红[1]　杨赵军[3]　同海妮[3]　孙利芹[4]　朱昌雄[2**]

（1.山东省农业科学院畜牧兽医研究所，山东省畜禽疫病防治与繁育重点实验室，济南 250100；2.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所，北京 100081；3.山东美事达农牧科技有限公司，济阳 264005；4.烟台大学生命科学学院，烟台 264005）

摘　要：为开拓螺旋藻饲料资源，本试验研究了螺旋藻单独及其与含有枯草芽孢杆菌和乳酸菌的益生菌联用对仔猪生长性能、免疫性能以及粪便菌群的影响。按 2×2 析因试验设计，将 80 头平均体重为（8.85±0.20） kg、口蹄疫（FMD）母源抗体为阴性的断奶仔猪随机均分为对照组、螺旋藻组(添加 0.5%的螺旋藻)、益生菌组(添加 0.5 kg/t 的益生菌)以及藻菌组(添加 0.5%的螺旋藻与 0.5 kg/t 的益生菌)，每组 5 个重复，每个重复 4 头猪，饲粮以粉料形式饲喂。试验期 28 d。第 8 日免疫猪 O 型及 A 型 FMD 疫苗，第 7 日及第 28 日采集血清及新鲜粪便。结果显示：1）螺旋藻显著提高了仔猪平均日增重($P$＜0.05)，显著降低了料重比($P$＜0.05)。2）第 7 日和第 28 日螺旋藻对 O 型和 A 型 FMD 抗体滴度皆无显著影响（$P$>0.05）。3)第 28 日螺旋藻极显著提高了仔猪血清免疫球蛋白 G(IgG)、免疫球蛋白 M（IgM）及补体 3 含量($P$＜0.01)，对血清补体 4 含量无显著影响（$P$>0.05）。4）第 7 日和第 28 日螺旋藻对仔猪粪便中乳酸菌、大肠杆菌数量无显著影响（$P$>0.05）。除第 28 日 IgG、IgM 和补体 3 含量外，螺旋藻与益生菌无互作($P$>0.05)。结果表明，FMD 疫苗免疫期间饲粮中添加 0.5%的螺旋藻可以促进仔猪的生长，与益生菌配伍能够提高仔猪的体液免疫性能。

关键词：螺旋藻；益生菌；仔猪；口蹄疫；互作

中图分类号：S816

随着人类生活水平的不断提高，“人类需要绿色食品，动物需要绿色饲料”的呼声日益高涨。螺旋藻(*Spirulina*，SPI)是一种光能自养型微生物，含有丰富的蛋白质、多糖、亚油酸、二十二碳六烯酸（DHA）、维生素、色素以及矿物质等营养成分，被世界卫生组织和联合国

---

[1]收稿日期：2016–09–21

基金项目：环保部水体污染控制与治理科技重大专项（2013ZX07103006-007）；山东省农业重大应用技术创新项目（鲁财农指〔2016〕36 号）

作者简介：盛清凯（1971–），男，山东德州人，研究员，博士，主要从事动物营养与饲料科学研究。E-mail: qksheng@163.com

*同等贡献作者

*通信作者：朱昌雄，研究员，博士生导师，E-mail: zhucx120@163.com

粮食及农业组织称为“21 世纪人类最理想的食品”；另外，SPI 还含有螺旋藻多糖、蓝藻蛋白、β–胡萝卜素、亚油酸、肌醇等具有抗菌、抗氧化、抗病毒等多种生理功能物质[1-2]，作为一种功能食品被广泛食用。最近几年，人们开始用污水培养 SPI[3]，使其生产成本不断降低，SPI 作为一种饲料原料或饲料添加剂也开始被广泛关注[4-5]。

SPI 饲用的主要目的之一在于促进动物的生长，提高机体的免疫力。SPI 应用于水产饲料可以提高鱼、虾的生长性能及免疫力[6]已经获得公认，单其对猪生产性能的影响存在争议[7]，主要争议在于 SPI 粉料与颗粒料的应用效果。由于 SPI 中含有抗菌、抗病毒物质[8]，动物免疫期间是否可以饲用尚不清楚。枯草芽孢杆菌、乳酸菌等作为一种促生长、防腹泻、提高免疫力的绿色饲料益生菌（probiotics，PRO）制剂常用于仔猪饲粮中[9]。而 SPI 与 PRO 之间能否配伍、互作也不清楚。因此，本文研究 SPI 单独及其与含有枯草芽孢杆菌和乳酸菌的 PRO 联用对口蹄疫（foot and mouth disease，FMD）疫苗免疫仔猪生长性能、免疫性能以及粪便菌群的影响，为饲料资源开发及健康养殖提供参考。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验材料

80 头体重（8.85±0.20） kg、FMD 母源抗体为阴性（O 型抗体滴度为 2.70±0.45，A 型抗体滴度为 2.80±0.50)的去势杜×大×长三元杂交断奶仔猪，济南百事得猪场提供。SPI 纯粉，山东博然螺旋藻生物股份有限公司生产，水分含量 5.0%，粗蛋白质含量 63%。PRO，开创阳光环保科技发展公司生产，其中枯草芽孢杆菌与乳酸杆菌的含量分别为 $1.0\times10^9$ 和 $1.0\times10^8$ CFU/g。猪 FMD 疫苗，中农威特生物科技有限公司生产。FMD O 型、A 型液相阻断酶联免疫吸附测定(ELISA)抗体检测试剂盒，中国农业科学院兰州畜牧兽医研究所生产。猪补体 3(complement 3,C3)、补体 4(complement 4,C4)ELISA 试剂盒，南京建成生物工程研究所生产。

### 1.2　试验设计

采用 2×2 试验设计，将 80 头断奶仔猪，按性别、体重基本一致的原则随机均分为 4 组，每组 5 个重复，每重复 4 头猪。对照组（control group,CG）饲喂基础饲粮，螺旋藻组(SPI group,SG)、益生菌组(PRO group,PG)以及藻菌组(SPI and PRO group,SPG)分别饲喂在基础饲粮中添加 0.5% SPI、0.5 kg/t PRO 以及 0.5% SPI+0.5 kg/t PRO 的试验饲粮。试验期为 28 d。

### 1.3　试验饲粮及饲养管理

基础饲粮为粉料，参照中华人民共和国农业行业标准《猪饲养标准》（NY/T 65—2004）配制，其组成及营养水平见表 1。全部仔猪网上饲养于同一猪舍，不同重复之间铁网隔离。仔猪自由采食与饮水，饲养程序一致。

表 1　基础饲粮组成及营养水平（风干基础）

Table 1　Composition and nutrient levels of the basal diet (air-dry basis)　　%

| 原料 Ingredients | 含量 Content | 营养水平 Nutrient levels[2)] | 含量 Content |
|---|---|---|---|
| 玉米 Corn | 63.37 | 消化能 DE/（MJ/kg） | 14.56 |
| 豆粕 Soybean meal | 25.90 | 粗蛋白质 CP | 20.43 |
| 鱼粉 Fish meal | 5.00 | 钙 Ca | 0.71 |
| 豆油 Soybean oil | 3.00 | 总磷 TP | 0.60 |
| 磷酸氢钙 $CaHPO_4$ | 0.74 | 有效磷 AP | 0.40 |
| 石粉 Limestone | 0.33 | 可消化赖氨酸 Digestible Lys | 1.23 |
| 食言 NaCl | 0.26 | 可消化蛋氨酸 Digestible Met | 0.40 |
| 赖氨酸 Lys | 0.31 | 可消化苏氨酸 Digestible Thr | 0.72 |
| 蛋氨酸 Met | 0.09 | 可消化色氨酸 Digestible Try | 0.20 |
| 预混料 Premix[1)] | 1.00 | 可消化含硫氨基酸 Digestible SAA | 0.78 |
| 合计 Total | 100.00 | | |

[1)]预混料为每千克饲粮提供Premix provided the following per kg of diet：Fe 100 mg,Cu 100 mg,Zn 100 mg,Mn 50 mg,Se 0.35 mg,I 0.4 mg,VA 4 650 IU,$VD_3$ 720 IU,VE 32 IU,$VK_3$ 2.2 mg,烟酸 niacin 30 mg,泛酸 pantothenic acid 20 mg,生物素 biotin 0.2 mg,叶酸 folic acid 1.0 mg,$VB_{12}$ 0.03 mg,$VB_1$ 2.4 mg,$VB_2$ 5 mg,$VB_6$ 2.4 mg。

[2)]营养水平为计算值。Nutrient levels were calculated values.

1.4　检测指标及方法

试验开始当天与结束后 1 天 08：00 全部生猪个体空腹称重，每重复生猪每周统计 1 次采食量，计算始重(IW)、末重(FW)、平均日增重（ADG）、平均日采食量（ADFI）及料重比(F/G)（$n$=5）。试验第 7 日每组每重复随机选 2 头仔猪空腹心脏采血，3 000 r/min 离心收集血清，用于测定血清指标（$n$=10）。第 8 日免疫猪 FMD O 型及 A 型疫苗，耳根后肌肉注射，接种剂量均为 1 mL/头。第 28 日 08：00 每组每重复剩余的 2 头仔猪空腹心脏采血，3 000 r/min 离心收集血清，用于测定血清指标（$n$=10）。第 7 日及第 28 日 12：00 每重复随机选 2 头猪采集新鲜粪便，采用 MRS 培养基、伊红美蓝培养基平板计数法分别测定乳酸菌与大肠杆菌数量（$n$=10）。

1.5　统计分析

按双因素模型采用 SAS V9.1 软件 GLM 程序对所有数据进行处理，计算平均值与标准误，分析 SPI 添加效应、PRO 添加效应及二者互作；以 Duncan 氏法进行多重比较，$P$<0.01 为差异极显著，$P$<0.05 为差异显著。数据结果用平均值和标准误表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 SPI 对仔猪生长性能的影响

由表 2 可以看出，螺旋藻组、益生菌组及藻菌组猪末重、平均日增重和平均日采食量极显著高于对照组($P$＜0.01)，料重比显著低于对照组($P$＜0.05)，3 组之间上述指标无显著差异($P$>0.05)。SPI、PRO 对仔猪平均日增重及料重比皆有显著影响($P$＜0.05)。SPI 和 PRO 二者无互作($P$>0.05)。

表 2 SPI 对仔猪生长性能的影响

Table 2 Effects of SPI on growth performance of piglets

| 项目 Items | 对照组 CG | 螺旋藻组 SG | 益生菌组 PG | 藻菌组 SPG | 标准误 SE | *P* 值 *P*-value | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 螺旋藻 SPI | 益生菌 PRO | 螺旋藻×益生菌 SPI×PRO |
| 始重 IW/kg | 8.81 | 8.90 | 8.89 | 8.84 | 0.04 | NS | NS | NS |
| 末重 FW/kg | 18.85$^{Bb}$ | 20.08$^{Aa}$ | 19.87$^{Aa}$ | 20.67$^{Aa}$ | 0.67 | <0.000 1 | 0.000 1 | 0.332 8 |
| 平均日增重 ADG/kg | 0.36$^{Bb}$ | 0.40$^{Aa}$ | 0.39$^{Aa}$ | 0.42$^{Aa}$ | 0.02 | <0.000 1 | 0.000 1 | 0.332 5 |
| 平均日采食量 ADFI/kg | 0.61$^{Bb}$ | 0.64$^{Aa}$ | 0.64$^{Aa}$ | 0.67$^{Aa}$ | 0.02 | 0.000 1 | 0.000 1 | 0.981 3 |
| 料重比 F/G | 1.70$^{Aa}$ | 1.60$^{Bb}$ | 1.63$^{ABb}$ | 1.59$^{Bb}$ | 0.04 | 0.006 2 | 0.047 7 | 0.259 4 |

同行数据肩标无字母或相同小写字母表示差异不显著($P$＞0.05)，不同小写字母表示差异显著($P$＜0.05)，不同大写字母表示差异极显著($P$＜0.01)。下表同。

In the same row, values with no letter or the same small letter superscripts mean no significant difference ($P$＞0.05), while with different small letter superscripts mean significant difference ($P$＜0.05), and with different capital letter superscripts mean significant difference ($P$＜0.01). The same as below.

NS 表示无统计学意义。NS mean no significance.

### 2.2 SPI 对仔猪抗体滴度的影响

由表 3 可以看出，试验第 7 日和第 28 日 SPI、PRO 对 O 型、A 型 FMD 抗体滴度皆无显著影响（$P$>0.05），二者无互作（$P$>0.05）。

表 3　SPI 对仔猪 FMD 抗体滴度的影响

Table 3　Effects of SPI on antibody titer of FMD of piglets

| 项目 Items | 时间 Time | 对照组 CG | 螺旋藻组 SG | 益生菌组 PG | 藻菌组 SPG | 标准误 SE | *P* 值 *P*-value 螺旋藻 SPI | 益生菌 PRO | 螺旋藻×益生菌 SPI×PRO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| O 型 O-type | 第 7 日 Day 7 | 2.60 | 2.80 | 2.70 | 2.90 | 0.10 | 0.291 5 | 0.977 3 | 0.992 0 |
| | 第 28 日 Day 28 | 7.80 | 8.00 | 7.90 | 8.10 | 0.10 | 0.216 8 | 0.353 6 | 0.264 6 |
| A 型 A-type | 第 7 日 Day 7 | 2.80 | 3.00 | 2.90 | 3.10 | 0.10 | 0.868 2 | 0.277 2 | 0.276 7 |
| | 第 28 日 Day 28 | 7.10 | 7.30 | 7.20 | 7.20 | 0.07 | 0.679 4 | 0.732 1 | 0.408 6 |

2.3　SPI 对仔猪免疫球蛋白含量的影响

由表 4 可以看出，对于免疫球蛋白（Ig）G，其血清含量第 7 日各组之间无显著差异（*P*>0.05），第 28 日螺旋藻组、益生菌组以及藻菌组血清 IgG 含量极显著高于对照组(*P*＜0.01)，且 SPI 和 PRO 之间互作极显著(*P*＜0.01)。对于 IgM，其血清含量第 7 日与第 28 日螺旋藻组、益生菌组以及藻菌组皆极显著高于对照组(*P*＜0.01)。对于 IgA，其血清含量第 7 日螺旋藻组与藻菌组显著高于对照组和益生菌组(*P*＜0.05)，对照组与益生菌组之间无显著差异（*P*>0.05）；第 28 日螺旋藻组、益生菌组以及藻菌组显著高于对照组(*P*＜0.05)，3 组之间彼此无显著差异（*P*>0.05）。

表 4　SPI 对仔猪血清免疫球蛋白含量的影响

Table 4　Effects of SPI on serum immunoglobulin contents of piglets　　ng/mL

| 项目 Items | 时间 Time | 对照组 CG | 螺旋藻组 SG | 益生菌组 PG | 藻菌组 SPG | 标准误 SE | *P* 值 *P*-value 螺旋藻 SPI | 益生菌 PRO | 螺旋藻×益生菌 SPI×PRO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 免疫 | 第 7 日 | 202.98 | 210.27 | 200.63 | 220.13 | 3.89 | 0.886 8 | 0.482 3 | 0.816 8 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 球蛋 | Day 7 | | | | | | | | |
| 白 G IgG | 第 28 日 Day 28 | $127.12^{Cc}$ | $153.01^{Bb}$ | $146.17^{Bb}$ | $204.89^{Aa}$ | 13.05 | <0.000 1 | 0.000 5 | 0.000 4 |
| 免疫球蛋 | 第 7 日 Day 7 | $30.07^{Bc}$ | $33.37^{Ab}$ | $33.57^{Ab}$ | $41.04^{Aa}$ | 1.87 | 0.008 4 | 0.003 4 | 0.024 3 |
| 白 M IgM | 第 28 日 Day 28 | $15.49^{Bb}$ | $25.29^{Ab}$ | $21.93^{Ab}$ | $29.08^{Ab}$ | 2.50 | <0.000 1 | 0.002 3 | 0.016 0 |
| 免疫球蛋 | 第 7 日 Day 7 | $68.01^{b}$ | $74.31^{a}$ | $68.30^{b}$ | $80.69^{a}$ | 2.50 | 0.025 9 | 0.418 0 | 0.463 4 |
| 白 A IgA | 第 28 日 Day 28 | $60.05^{b}$ | $72.77^{a}$ | $76.54^{a}$ | $81.84^{a}$ | 4.02 | 0.014 6 | 0.043 3 | 0.605 4 |

## 2.4 SPI 对仔猪补体含量的影响

由表 5 可以看出，对于 C3，其血清含量第 7 日各组之间无显著差异（$P$>0.05），第 28 对照组极显著低于其他 3 组($P$<0.01)，SPI 与 PRO 之间存在互作($P$<0.05)；对于 C4，其血清含量第 7 日、第 28 日各组之间皆无显著差异（$P$>0.05）。

表 5 SPI 对仔猪血清补体含量的影响

Table 5 Effects of SPI on serum complement contents of piglets μg/mL

| 项目 Items | 时间 Time | 对照组 CG | 螺旋藻组 SG | 益生菌组 PG | 藻菌组 SPG | 标准误 SE | *P* 值 *P*-value 螺旋藻 SPI | 益生菌 PRO | 螺旋藻×益生菌 SPI×PRO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 补体 3 C3 | 第 7 日 Day 7 | 240.67 | 256.96 | 237.95 | 267.31 | 6.01 | 0.334 2 | 0.819 0 | 0.725 0 |
| | 第 28 日 Day 28 | $100.31^{Bc}$ | $137.48^{Ab}$ | $152.74^{Ab}$ | $202.17^{Aa}$ | 6.05 | 0.006 3 | 0.000 1 | 0.012 9 |
| 补体 4 C4 | 第 7 日 Day 7 | 29.81 | 35.19 | 33.44 | 37.64 | 1.43 | 0.848 4 | 0.321 6 | 0.123 6 |
| | 第 28 日 Day 28 | 29.07 | 33.34 | 33.66 | 33.79 | 0.98 | 0.666 2 | 0.500 8 | 0.881 3 |

2.5 SPI 对仔猪粪便菌群的影响

由表 6 可以看出，对于乳酸菌，其数量对照组与螺旋藻组在第 7 日、第 28 日皆无显著差异（$P$>0.05），二者显著低于益生菌组和藻菌组($P$＜0.05)；对于大肠杆菌，其数量对照组与螺旋藻组在第 7 日、第 28 日也无显著差异（$P$>0.05），二者皆显著高于益生菌组和藻菌组($P$＜0.05)。对于乳酸菌和大肠杆菌，SPI 效应不显著($P$＞0.05)，PRO 效应显著($P$＜0.05)，二者无互作($P$＞0.05)。

表 6 SPI 对仔猪粪便菌群的影响

Table 6 Effects of SPI on microflora in faeces of piglets lg（CFU/g）

| 项目 Items | 时间 Time | 对照组 CG | 螺旋藻组 SG | 益生菌组 PG | 藻菌组 SPG | 标准误 SE | $P$ 值 $P$-value 螺旋藻 SPI | 益生菌 PRO | 螺旋藻×益生菌 SPI×PRO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 乳酸菌 *Lactobacilli* | 第 7 日 Day 7 | 8.22$^{Bb}$ | 8.36$^{Bb}$ | 9.44$^{Aa}$ | 9.46$^{Aa}$ | 0.41 | 0.500 5 | <0.000 1 | 0.374 3 |
| | 第 28 日 Day 28 | 8.11$^{b}$ | 8.32$^{b}$ | 8.74$^{a}$ | 8.81$^{a}$ | 0.14 | 0.343 8 | 0.010 9 | 0.628 4 |
| 大肠杆菌 *E. coli* | 第 7 日 Day 7 | 5.84$^{Aa}$ | 5.78$^{Aa}$ | 5.09$^{Bb}$ | 5.31$^{Bb}$ | 0.40 | 0.430 2 | 0.000 2 | 0.180 5 |
| | 第 28 日 Day 28 | 5.86$^{a}$ | 5.71$^{a}$ | 5.51$^{b}$ | 5.49$^{b}$ | 0.17 | 0.440 6 | 0.025 0 | 0.572 3 |

# 3 讨 论

## 3.1 SPI 对仔猪生长性能的影响

本试验中，SPI 粉料提高仔猪平均日增重及降低料重比的结果，与吕子君等[10]报道相似，与 Grinstead 等[11]报道相反。吕子君等[10]报道 SPI 湿拌料饲喂可以促进仔猪的生长，Grinstead 等[11]认为 SPI 替代豆粕后制作成颗粒料饲喂对断奶仔猪生长无显著影响，差异原因可能在于饲粮类型及 SPI 作为蛋白质原料替代物的不同[7]。本试验发现 SPI 与 PRO 对于仔猪平均日增重及料重比互作效果不显著，揭示 SPI 中的营养物质或生理功能物质与枯草芽孢杆菌及乳酸菌在促生长方面无累加作用，这与 Ramakrishnan 等[12]报道的 SPI 与 PRO 协同促进鲤鱼生长的结果不同，差异原因可能在于试验动物不同。由于枯草芽孢杆菌、乳酸菌主要通过调节

肠道菌群发挥作用，本结果表明SPI促生长的机理与PRO不同。SPI中17种氨基酸均衡[13-14]，SPI多糖[15]及亚油酸、二十二碳六烯酸等[16]营养物质皆有促生长作用，主要的促生长物质有待进一步确定。

3.2　SPI对仔猪免疫性能的影响

基于抗病毒药物对疫苗可能产生不利影响，实际生产中疫苗免疫前后4周内一般不建议给猪使用抗病毒药物。SPI中可能含有抗病毒及抗菌物质[8]，其对猪FMD抗体的影响未见报道。本试验发现无论是免疫前还是免疫后SPI对A型FMD抗体、O型FMD抗体的产生均无不利影响，即不影响病毒疫苗的使用，这有助于SPI在仔猪免疫过程中的应用。Daoud等[17]认为安全剂量的SPI乙醇提取物可以降低O型、A型、SAT2型FMD病毒对小鼠的毒性，间接证明SPI可以在仔猪上使用。

由于IgG、IgM和IgA是参与体液免疫的主要抗体，其含量可以反映机体的体液免疫水平。本试验中SPI提高了血清IgG、IgM和IgA的含量，表明SPI主要通过体液免疫提高机体的免疫力，该结果与Qureshi等[18]在肉鸡上的试验结果相似。补体是存在于动物血清中的一组与免疫相关并具有酶活性的球蛋白，可辅助和补充特异性抗体，介导免疫和溶菌。SPI对猪补体的影响未见报道。本试验中FMD免疫后SPI提高了血清C3的含量，与SPI提高血清IgG含量的结果相对应，揭示SPI可能通过旁路途径扩大体液免疫效应，调节免疫应答。

本试验发现免疫后SPI与PRO对IgG、IgM及C3含量存在互作，具体原因不清。本试验中PRO提高血清IgG及C3含量的结果与祝天龙等[19]结果相似。枯草芽孢杆菌和SPI二者皆能刺激T细胞、B细胞以及巨噬细胞等免疫细胞[17,20-21]或诱导黏膜免疫反应[22-23]，推测其可能与细胞免疫或黏膜免疫有关。

3.3　SPI对仔猪粪便菌群的影响

本试验中SPI对仔猪肠道菌群无影响的结果与豆新志[24]结果不同。本试验为正常动物活体饲养试验，豆新志[24]用SPI治疗腹泻模型的小鼠。本试验SPI与PRO对仔猪菌群无互作影响的结果与梁冰等[25]所得结果也不同。梁冰等[25]为体外培养检测SPI对不同菌群的影响。本试验结果间接证实SPI并非通过肠道菌群途径增强机体的生长性能和免疫功能[26]，其与PRO的作用机制不同。

由于SPI含有促生长、抗菌、抗病毒及抗氧化等众多生理功能物质，不同物质之间可能存在交互作用[27]，其对仔猪生长、免疫等的影响有必要分别进行研究。另外，添加SPI后增加饲料成本也是不得不考虑的问题。本试验所用的SPI为采用泉水培养的人食用的SPI，养殖成本在1 000元/kg以上，按此推算饲粮成本增加5.0元/kg以上，大幅度提高了饲粮成

本，可能不利于 SPI 的应用。随着污水养藻技术的成熟[3]，SPI 养殖成本逐渐降低，这将为 SPI 饲粮的广泛推广提供支撑。

4 结 论

① 仔猪 FMD 疫苗免疫期间饲喂添加 0.5% SPI 的饲粮，可以提高仔猪的生长性能，且对仔猪 FMD 抗体的产生无不良影响。

② SPI 与含有枯草芽孢杆菌与乳酸菌的 PRO 配伍，协同提高 FMD 免疫仔猪的体液免疫性能，但二者在促进仔猪生长、调节免疫以及肠道菌群方面的作用机理不同。

③ 建议以 SPI 粉料饲粮饲喂仔猪。

参考文献：

[1] BATISTA A P,GOUVEIA L,BANDARRA N M,et al.Comparison of microalgal biomass profiles as novel functional ingredient for food products[J].Algal Research,2013,2(2):164–173.

[2] CHRISTAKI E,BONOS E,GIANNENAS I,et al.Functional properties of carotenoids originating from algae[J].Journal of the Science of Food and Agriculture,2013,93(1):5–11.

[3] 张红红,刘锐,张永明,等.利用养猪废水养殖钝顶螺旋藻及净化水质初步研究[C]//中国环境科学学会 2012 学术年会论文集.南宁:中国环境科学学会,2012:1859–1964.

[4] YAAKOB Z,ALI E,ZAINAL A,et al.An overview:biomolecules from microalgae for animal feed and aquaculture[J].Journal of Biological Research-Thessaloniki,2014,21:6.

[5] BENEMANN J.Microalgae for biofuels and animal feeds[J].Energies,2013,6(11):5869–5886.

[6] ADEL M,YEGANEH S,DADAR M,et al.Effects of dietary *Spirulina platensis* on growth performance,humoral and mucosal immune responses and disease resistance in juvenile great sturgeon (*Huso huso*,linnaeus,1754)[J].Fish & Shellfish Immunology,2016,56:436–444.

[7] HOLMAN B W B,MALAU-ADULI A E O.*Spirulina* as a livestock supplement and animal feed[J].Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition,2013,97(4):615–623.

[8] YAKOOT M,SALEM A.*Spirulina platensis* versus silymarin in the treatment of chronic hepatitis C virus infection.A pilot randomized,comparative clinical trial[J].BMC Gastroenterology,2012,12:32.

[9] 高林,贾卿,宋良敏,等.枯草芽孢杆菌、乳酸菌、酵母菌复合制剂对断奶仔猪生产性能和血清免疫指标的影响[C]//中国畜牧兽医学会动物微生态学分会第十一次全国学术研讨会暨第五届会员代表大会论文集.重庆:中国畜牧兽医学会动物微生态学分会,2014:149.

[10] 吕子君,姚东林,王超,等.螺旋藻添加剂对猪生长、腹泻率及肌肉营养的影响[J].江苏农业科学,2015,43(7):206–209.

[11] GRINSTEAD G S,TOKACH M D,DRITZ S S,et al.Effects of *Spirulina platensis* on growth performance of weanling pigs[J].Animal Feed Science and Technology,2000,83(3/4):237–247.

[12] RAMAKRISHNAN C M,HANIFFA M A,MANOHAR M,et al.Effects of probiotics and *Spirulina* on survival and growth of juvenile common carp (*Cyprinus carpio*)[J].The Israeli Journal of Aquaculture-Bamidgeh,2008,60(2):128–133.

[13] ALVARENGA R R,RODRIGUES P B,DE SOUZA CANTARELLI V,et al.Energy values and chemical composition of *Spirulina* (*Spirulina platensis*) evaluated with broilers[J].Revista Brasileira de Zootecnia,2011,40(5):992–996.

[14] SPOLAORE P,JOANNIS-CASSAN C,DURAN E,et al.Commercial applications of microalgae[J].Journal of Bioscience and Bioengineering,2006,101(2):87–96.

[15] 万顺康,左绍远,张翠香.螺旋藻多糖对肉仔鸡生长性能、免疫功能及生化指标的影响[J].饲料研究,2013(9):70–73.

[16] ALESSANDRI J M,GOUSTARD B,GUESNET P,et al.Polyunsaturated fatty acids status in blood,heart,liver,intestine,retina and brain of newborn piglets fed either sow milk or a milk replacer diet[J].Reproduction Nutrition Development,1996,36(1):95–109.

[17] DAOUD H M,SOLIMAN E M.Evaluation of *Spirulina platensis* extract as natural antivirus against foot and mouth disease virus strains (A,O,SAT2)[J].Veterinary World,2015,8(10):1260–1265.

[18] QURESHI M A,GARLICH J D,KIDD M T.Dietary *Spirulina platensis* enhances humoral and cell-mediated immune functions in chickens[J].Immunopharmacology and Immunotoxicology,1996,18(3):465–476.

[19] 祝天龙,李奎,邵强,等.枯草芽孢杆菌制剂对仔猪生长及免疫的影响[J].饲料研究,2015(3):26–31.

[20] DUC L H,HONG H A,UYEN N Q,et al.Intracellular fate and immunogenicity of *B.subtilis* spores[J].Vaccine,2004,22(15/16):1873–1885.

[21] HAYASHI O,KATOH T,OKUWAKI Y.Enhancement of antibody production in mice by dietary *Spirulina platensis*[J].Journal of Nutritional Science and Vitaminology,1994,40(5):431–441.

[22] ZHAO G Y,MIAO Y,GUO Y,et al.Development of a heat-stable and orally delivered recombinant M2e-expressing *B.subtilis* spore-based influenza vaccine[J].Human Vaccines & Immunotherapeutics,2014,10(12):3649–3658.

[23] HAYASHI O,ISHII K,KAWAMURA C,et al.Enhancement of mucosal immune functions by dietary *Spirulina platensis* in human and animals[J].Nutritional Sciences,2004,7(1):31–34.

[24] 豆新志.螺旋藻对抗生素相关性腹泻小鼠大便中菌群的影响[J].南方农业,2016,10(9):178–180.

[25] 梁冰,吴力克,张学成.螺旋藻在体外对肠道菌群增殖的促进作用[J].中国海洋药物,1999(3):7–10.

[26] 吴娟娟.肠道菌群对仔鸡肠道黏膜结构、免疫功能及脂肪代谢的影响[D].硕士学位论文.南昌:江西农业大学,2015.

[27] WU Q H,LIU L,MIRON A,et al.The antioxidant,immunomodulatory,and anti-inflammatory activities of *Spirulina*:an overview[J].Archives of Toxicology,2016,90(8):1817–1840.

Effects of *Spirulina* on Growth Performance, Immune Function and Fecal Flora of Piglets

SHENG Qingkai[1] LIU Xue[2*] HAN Hong[1] YANG Zhaojun[3] TONG Haini[3] SUN Liqin[4] ZHU Changxiong[2**]

(1. *Institute of Animal Science and Veterinary Medicine*, *Shandong Academy of Agricultural Sciences*, *Shandong Provincial Key Laboratory of Animal Disease Control and Breeding*, *Jinan* 250100, *China*; 2. *Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture*, *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, *Beijing* 100081, *China*; 3. *Shandong Meishida Animal Husbandry Science and Technology Co. Ltd*., *Jiyang* 264055, *China*; 4. *College of Life Sciences*, *Yantai University*, *Yantai* 264005, *China*)

Abstract**:** The effects of *Spirulina* alone or combined with probiotics (*Bacillus subtilis* and *Lactobacilli*) on growth performance, immune function and fecal flora of piglets were investigated as means to explore *Spirulina* feed resource. According to a 2×2 factorial design, eighty weaning

piglets with the average body weight of (8.85±0.20) kg and negative foot-and-mouth disease (FMD) maternal antibody were assigned to control group, *Spirulina* group (plus 0.5% *Spirulina*), probiotics group (plus 0.5 kg/t probiotics) and *Spirulina* probiotics group (plus 0.5% *Spirulina* and 0.5 kg/t probiotics) randomly. Each group included 5 pens with 4 pigs in each pen. Piglets were fed powder feed and the whole test lasted for 28 days. On the 8th day, all piglets were vaccinated with O-type and A-type FMD vaccine, and on the 7th and 28th days, serum and fresh feces were collected. The results showed as follows: 1) *Spirulina* significantly increased average daily gain and decreased the ratio of feed to gain of piglets ($P<0.05$). 2) On the 7th and 28th days, *Spirulina* did not influence O-type and A-type FMD antibody titers ($P>0.05$). 3) On the 28th day, *Spirulina* extremely significantly increased the serum contents of immunoglobulin (Ig) G, IgM and complement 3 (C3) ($P<0.01$), and did not affect the serum complement 4 content ($P>0.05$) of piglets. 4）On the 7th and 28th days, *Spirulina* did not affect *Lactobacilli* and *E. coli* amounts in feces ($P>0.05$). Interactions about serum IgG, IgM and C3 contents between the *Spirulina* and probiotics were significant on the 28th day ($P<0.05$), and the others were not ($P>0.05$). It is concluded that additional 0.5% *Spirulina* in the diet can promote growth and synergistically improve the humoral immune function combined with probiotics during the FMD vaccination of piglets.

Key words: *Spirulina*; probiotics; piglets; foot and mouth disease; interaction

i

---

*Contributed equally
**Corresponding author, professor, E-mail: zhucx120@163.com (责任编辑　田艳明)